2001년도 대한전기학회 전문대학교육위원회 학술대회 논문집 2001.7.10-11

새로운 MPB BLDC 전동기용 구동장치 개발

°김상욱, 이용근, 김영봉
인하공업전문대학 전기과

Development of Drive System for a New MPB BLDC Motors

°Sang-Uk Kim, Yong-Geun Lee, Young-Bong Kim
Inha Technical College, Department of Electrical Engineering

Abatract-In this paper, a drive system for multi-phase bipolar brushless DC (MPB BLDC) motor is presented. This drive system is used for an electric bicycle. In general, the maximum and minimum speed of electric bicycle are required by law. At first, the proposed controller is satisfied for the limited speed control. Secondly, the system has a technique of exited with modulation(EWM), bidirection control, and partial square wave control. Thirdly, the controller is designed for system stability. Experimental results show the performance of the proposed controller of MPB BLDC motors for an electric bicycle.

1. 서론

전기자전거용 구동을 위해 종래에는 직류전동기가 널리 사용되어 왔다. 이러한 직류전동기가 사용되는 이유는 제어기 및 시스템이 간단하여 제어가 매우 용이하고 제어범위도 넓기 때문이다. 그러나 직류전동기는 브러시 등의 보수점검이 필요하여, 수명이 단축되고, 소음 등을 가지는 단점을 가지고 있다. 이러한 이유로 근래에 구조적 견고성 및 고효율을 추구하기 위하여 전기자전거용으로 BLDC 전동기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 기존의 전기자전거로 사용되는 직류전동기나 BLDC 전동기의 경우 속도 비율의 감소를 위해 감속기를 사용하거나 기어 및 체인을 이용하여 속도를 줄이는 방식이 채택되고 있다. 따라서 이 경우 감속기 등에 의한 소음은 사용자에 대한 거부감을 유발하고, 감속기 및 체인 등으로 인한 손실을 동반하여 한정된 밧데리 전원으로 구동되는 경우 사용시간을 단축시키는 단점 등을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이들의 단점을 극복하기 위하여 감속기를 사용하지 않고 고 효율로 운전되는 MPB(Multi-Phase Bipolar) BLDC 전동기 를 적용하였으며, 이를 최적으로 구동하기 위한 드라이브 시스템을 개발하고자 한다. 법률적으로 최고속도 및 최저속도로 제한된 속도제어 시스템을 구현하기 위한 하드웨어 및 소프트웨어를 설계 제작하였으며, 또한 MPB BLDC 전동기의 특징을 확보하기 위한 시스템을 동시에 만족하도록 구성하였다. 설계된 드라이브 시스템을 통하여 실험을 실시하였으며, MPB BLDC 전동기의 양호한 성능을 볼 수 있었다.

2. MPB BLDC 전동기의 특징

MPB BLDC 전동기의 특징은 다음과 같다. 그림 1과 그림 2는 전동기의 회전자 마그네틱 및 고정자 권선의 구조를 나타내고 있다.

MPB BLDC 전동기의 구조적 특징은 다음과 같다.
- 3상의 병렬 독립권선으로 구성된 고정자
- 규소강판 적층내에 막대자석을 방사형으로 매입한 16극의 회전자
- 각상 마다 2개의 광센서(총 6개 센서)
- 슬롯 코어형의 고정자로 16극의 lap winding 권선 방식
- 통상적인 Inner type 회전자를 피하고 자전거에 장착하는데 가장 효과적인 Outer 회전자 Rotor 구조를 채택
- Nd계 희토류 영구자석을 규소강판 적층내에 방사형으로 매입한 회전자

MPB BLDC 전동기의 제어기의 특징은 다음과 같다.
- 여자폭 변조(Excited Width Modulation)
- 선행정류(Advanced Commutation)
- 양방향 제어(Bidirection Control)
- 부분 구형파 제어 (Partial Square Wave Control)

MPB BLDC 전동기의 특성은 다음과 같다.
- 넓은 운전범위에서 고효율 (High Efficiency across a broad operating range)
- 정 출력 (Constant Power)
- 저속에서 고토크 (High Torque at Low speed)
- 고속에서 고출력 (High Power at High speed)
- 초고속 및 정속 (High speed and stable speed)
- 쉽고 빠른 정역전환 (Easy and quick reversibility)
- 무단변속 (Variable speed without gear)

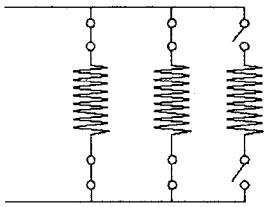


그림 1 고정자 권선의 구조

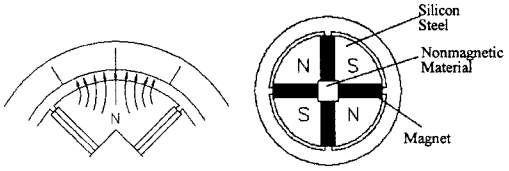


그림 2 회전자의 구조

3. MPB BLDC 전동기를 이용한 전기자전거의 특징

현재까지의 전기자전거는 다음과 같이 크게 4가지

로 나눌 수 있으며, 각각의 방식에 대한 자전거 형태는 그림 3-7과 같고, 각각의 제어기의 특징은 표 1과 같다.

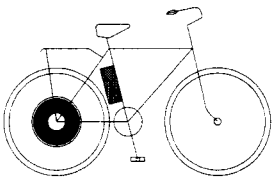


그림 3. 제안된 방식

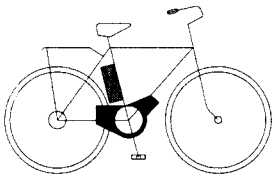


그림 4 체인 방식(Yamaha)

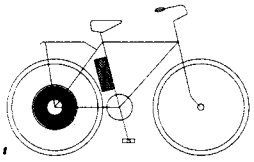


그림 5 체인/벨트 방식(US Pro-drive, EV Global)

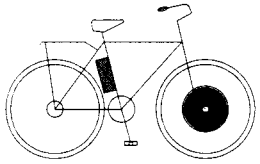


그림 6 감속기가 사용된 방식(Ele-bike)

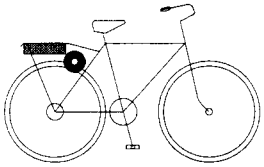


그림 7 마찰을 이용한 방식

표 1 기존 방식 및 제안된 방식의 특징

항 목	제안된 시스템	기 존 제 품	
모터종류	Brushless DC	Brushed DC	Brushed DC
감속장치	Gearless Motor	Geard Motor	Geard Motor
동력전달 방식	Hub Drive	Friction Drive Chain Drive	Hub Drive Crank Drive Friction Drive
Controller	내장형	외장형	외장형
모터Type	Pan-Cake Hub-Type	Geard Type	HubType Geard Type
정격출력	150W	160-400W	150-500W
System 효율	80%	75%	78%
1회충전 운행거리	32km	15- 30km	19-30 km
최대속도	24km/h	20-30 km/h	24km/h
Battery	24V 납축전지 (12Vx12AH)	12V, 24V 납축전지 (12Vx45AH) (12Vx12AH) (12Vx17AH)	24V NiCd전지 (12Vx9AH) 납축전지 (12Vx12AH)
Starting 방식	3km/h 이상에서	0km/h 이상에서	0km/h 이상에서

4. MPB BLDC 전동기용 제어기 설계

제어 시스템은 그림 8과 같이, 배터리와 인버터, 과전류 검출부, 전원부(SMPS), 속도조절부, PWM 발생부, 제어부, 게이트구동부, 속도센서로 구성되어 MPB BLDC 전동기를 제어한다. MPB BLDC 전동기는 고정자의 상수와 회전자의 극수를 16극으로 고정자의 상수를 3상으로 한다. 이러한 BLDC 전동기는 고정자 권선이 각 상별로 병렬 독립 권선 되어 있고, BLDC 전동기의 정류 엔코더(Commutation Encoder)에 설치되어 회전자의 위치를 검출하기 위한 광센서(X1,Y1,X2,Y2,Z1,Z2)로부터 각 상을 여자시키기 위한 광센서신호(회전자 위치감지신호)가 출력되어 전동기 제어장치로 입력된다. 이 때, 고정자의 상은 여자상과 1개 이상의 비여자상이 발생하도록 되어 토크 왜곡이 발생되는 극전환 영역에서 반발 토오크를 차단하도록 제어된다. 그리고 전동기를 보호하기 위하여 일정 온도 이상에서 작동되는 온도센서신호 등을 출력한다.

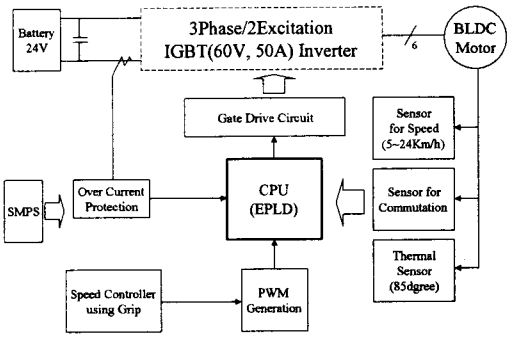


그림 8 제어시스템 블록도

또한 배터리는 인버터의 스위칭소자를 통해 BLDC 전동기의 각 고정자 권선에 직류전원을 제공하고, 스위칭 모드 전원공급장치 (SMPS)는 배터리 전원을 이용하여 시스템에서 필요로 하는 전원을 공급한다.이 때, 시스템에서 요구되는 전원은 각 회로소자를 동작시키기 위한 Vcc전원(+5V)과 제어전원(+15V), 게이트구동을 위한 구동전원(+15V) 등이다.

과전류검출부는 배터리의 출력전류를 감시하여 과전류가 발생되는 것을 검출하기 위한 것이고, 속도조절부는 운전자의 조작에 따라 속도조절신호를 발생하며, PWM발생부는 속도조절신호에 따라 펄스폭이 가변되는 펄스폭변조(PWM)신호를 발생한다. 전기자전거의 핸들에 장착된 그립의 조작에 따라 속도조절신호가 발생되고, 속도를 증가시키고자 할 경우에 상대적으로 폭이 넓은 펄스폭변조(PWM)신호가 발생된다.

제어부는 다수의 입출력 포트를 제공하기 위해 EPLD로 구현되며, BLDC 전동기로부터 광센서신호와 온도신호 등을 입력받고, 과전류검출부로부터 과전류검출신호를 입력받으며, PWM 생부로부터 속도에 따른 PWM 신호를 입력받아 구동신호를 발생하여 게이트 구동부를 통해 인버터의 스위칭소자를 제어한다. 이러한 제어부는 PWM신호와 광센서신호로부터 구동신호를 생성하고, 제어 알고리즘에 따라 정해진 속도범위에서만 동작하도록 제어 온/오프신호를 발생하며, 과전류나 전동기의 과열등이 검출되면 회로소자를 보호하기 위해 제어 오프신호를 발생한다.

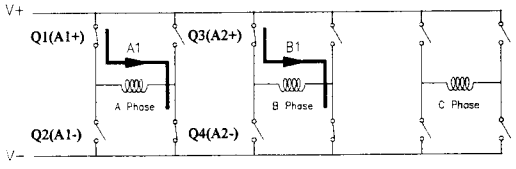


그림 9 인버터 주회로도

인버터는 그림 9에 나타낸 바와 같이, 각 고정자 권선에 직류전원을 인가하기 위한 것으로, 모터의 종류(즉, 고정자 권선의 상 수)에 따라 구성이 달라질 수 있다.

고정자 권선을 3상으로 할 경우, 3상을 구동하기 위한 인버터 회로를 보여 주고 있다. 하나의 상을 구동하기 위해서는 4개의 전력용 스위칭 소자 H브리지가 필요하다.

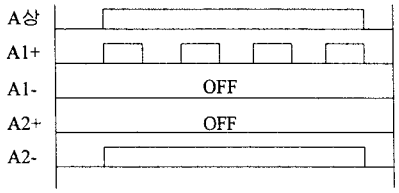


그림 10 휴지기간이 없는 파워 소자 온, 오프 타이밍 도

H 브리지의 하부 아암을 구성하는 스위칭소자들(Q2,Q4)은 구동 타이밍에 계속 오프시켜 두고, 상부 아암의 스위칭소자(Q1,Q3)에만 PWM신호를 인가하여 제어하므로 구동신호가 간단하고, 3상 2여자 방식의 광센서신호에 의해 A1+ 구동신호와 A1- 구동신호 혹은 A2+ 구동신호와 A2- 구동신호가 동시에 하이인 경우가 발생되지 않으므로, 그림 10과 같이 휴지기간(dead time)을 고려할 필요가 없다. 따라서 게이트 구동회로는 제어절차가 단순화되어 그 만큼 안전성을 향상시킬 수 있다.

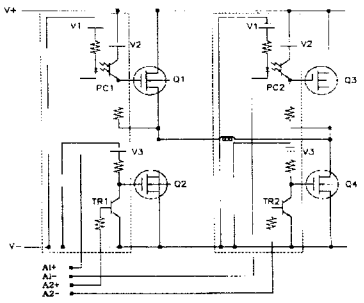


그림 11 게이트 구동 회로

그림 11은 그림 10에 나타낸 A상 H브리지의 상세 회로도로서, 게이트 구동부에 사용되는 전원의 수를 개선한 것을 설명하기 위한 도면이다. 즉, 종래에는 H 브리지를 구성하는 각 전력소자를 구동하기 위하여 요구되는 전원의 수가 적어도 '상부 아암 스위칭소자의 수+1' 만큼 각각 필요하나, 상부 아암의 구동에 포토 커플러(PC1,PC2)를 이용하여 전원을 격리시킴과 동시에 단지 2개의 전원만으로 모든 H브리지를 구동할 수 있도록 함으로써 요구되는 전원의 수를 줄인 것이다. 제1 스위칭소자(Q1)의 게이트에는 포토 커플러(PC1)를 통해 구동전원(V2)이 연결되어 있다. 이 때 종래의 구동전원은 -측이 스위칭 소자의 소스와 권선의 연결점에 접속되어 있기 때문에 상부 아암 스위칭소자의 수만큼 각각의 전원이 요구되었으나 본 발명에서는 구동전원(V2)의 -측을 주 공급전원의 'V+'에 연결함으로써 하나의 구동전원(V2)을 상부 아암 스위칭소자들이 공통으로 사용할 수 있게 한 것이다. 포토 커플러(PC1)가 온되면 해당 구동전원(V2)과 저항에 강하된 전압(V+와 V-사이 주 공급전원의 전압)의 합이 게이트에 인가되도록 되어 있으며, 포토 커플러(PC1)의 발광다이오드에는 제어전원(V1)이 연결되어 있다. 제2 스위칭소자(Q2)의 게이트는 저항을 통해 구동전원(V3)이 연결됨과 아울러 트랜지스터(TR1)를 통해 V-와 연결되어, 트랜지스터(TR1)가 온되면 게이트가 로우 레벨이 되도록 되어 있다. 그리고 포토 커플러(PC1)의 발광다이오드에는 구동신호 A1+가 연결되어 포토 카플러(PC1)를 통해 제1 스위칭소자(Q1)를 온/오프 제어할 수 있도록 되어 있고, 트랜지스터(TR1)의 베이스에는 구동신호 A2+가 연결되어 제2 스위칭소자(Q2)를 온/오프 제어할 수 있도록 되어 있다. 이와 같이 구동전원(V2)의 V-측을 공급전원(BAT)의 "V+"에 연결하여 사용함으로써 하나의 전원으로 모든 상부 아암의 스위칭소자를 구동할 수 있으므로 요구되는 전원의 수를 줄일 수 있다. 제3 스위칭소자(Q3)와 제4 스위칭소자(Q4)의 구동회로는 제1 스위칭소자(Q1)와 제2스위칭 소자(Q2)의 구동회로와 동일하다.

MPB BLDC 모터는 3상이므로 2개의 감지구간이 형성된 정류 엔코더와 6개의 광센서가 사용된다. 이 때, 6개의 광센서는 X1, Y1, Z1, X2, Y2, Z2 순으로 배열되어 설치되어 있고, 각 센서에서 감지된 신호도 X1, Y1, Z1, X2, Y2, Z2라 한다. 여기서, X1, X2는 A상을 여자시키기 위한 센서이고, Y1,Y2는 B상을 여자시키기 위한 센서이며, Z1,Z2는 C상을 여자시키기 위한 센서이다. 6개의 광센서중 정류 엔코더의 감지구간에서 순차적으로 2개씩의 광센서가 하이펄스를 출력하여 3상의 고정자 권선 중 2상만 순차적으로 여자된다.

또한 제어부는 PWM신호와 광센서신호로부터 구동신호를 생성하는 구동신호 생성부와, 제안된 알고리즘에 따라 동작하도록 온/오프신호를 발생하는 제어부, 구동신호와 제어부의 출력 및 과전류신호나 온도신호 등을 결합하여 최종적으로 게이트를 구동하기 위한 구동신호를 출력하는 신호결합부로 구성된다.

그리고 구동신호 생성부는 광센서신호를 입력받아 그대로 하부아암 구동신호를 발생하는 하부아암 구동신호 생성부와, 광센서신호와 PWM신호를 결합(AND)하여 상부 아암신호를 발생하는 상부아암 구동신호 생성부로 이루어진다. 이와 같이 구동신호 생성부에서 생성되는 구동신호는 다음 표 2와 같다.

표 2 PWM 게이트 신호

센서신호 (입력)	구동신호 (출력)	제어상 (소자)	구동소자
X1,Y1,Z1, X2,Y2,Z2	A1+=X1pwm	A상(Q1)	상부아암
	A2+=X2pwm	A상(Q3)	
	B1+=Y1pwm	B상(Q1)	
	B2+=Y2pwm	B상(Q3)	
	C1+=Z1pwm	C상(Q1)	
	C2+=Z2pwm	C상(Q3)	
	A1-=X2	A상(Q2)	하부아암
	A2-=X1	A상(Q4)	
	B1-=Y2	B상(Q2)	
	B2-=Y1	B상(Q4)	
	C1-=Z2	C상(Q2)	
	C2-=Z1	C상(Q4)	

그림 13은 그림 12의 구조로부터 설치된 속도센서로부터 속도를 계산하는 신호파형도이다. MPB BLDC 모터가 장착된 대상(전기자전거)의 속도는 휠(바퀴)에 부착되어 회전을 검출하는 속도센서를 이용하여 구한다. 즉, 속도센서는 1바퀴 회전시마다 구형펄스를 출력하고, 클럭펄스는 일정한 주기로 계속 발생되고 있으므로 그림 13과 같이, 속도센서로부터 입력된 구형펄스 사이(즉, 1바퀴 회전시)에 클럭을 카운터하여 속도를 산출한다. 예컨대, 속도가 빨라지면 1회전(속도센서신호와 속도센서신호 사이) 동안에 클럭에 의해 카운터된 카운터값은 감소하게 되고, 속도가 느려지면 카운터값이 증가하게 된다. 따라서 하한속도에 해당하는 카운터값을 '하한속도 카운터값(C 카운터)'으로 정의하고, 상한속도에 해당는 카운터값을 '상한속도 카운터값(B카운터)'로 정의하면 카운터값을 측정하여 하한속도와 상한속도의 범위내에서만 모터가 구동되도록 할 수 있다. 전기자전거의 경우, 속도범위를 3 내지 24 Km/H로 설정하는 것이 바람직하다.

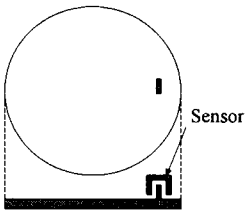


그림 12 속도 검출을 위한 모터의 구조

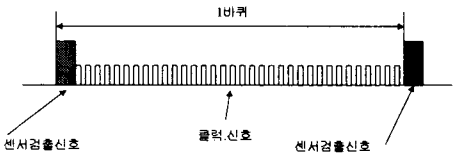


그림 13 속도 센서 신호 및 구형파 발생 신호

그림 14는 속도 제어부의 제어 알고리즘을 도시한 흐름도이다. 임의시간 t에 속도센서신호가 검출되었는지를 판단하여 속도센서신호가 검출되지 않으면, 제어회로를 오프한다. 제어회로가 오프되면 전기자전거일 경우에 모터가 아닌 사람의 힘(자전거 패달을 밟아 기어를 구동하여)에 의해 움직이게 된다.

속도센서신호가 검출되면, 클럭을 카운터하기 시작한다. 이어 제1 카운터에 카운터값을 저장한 후 제1 카운터의 카운터값과 소정의 임계 A 카운터값을 비교한다. 이 때, 속도센서에 의해 회전 시작이 검출된 후 1회전이 되기 전에 정지할 경우에는 다음 속도센서신호가 입력되지 않으므로 카운터값이 무한히 증가하게 된다. 따라서 임계 A 카운터값을 설정하여 카운터값이 일정한 값 이상이 되면, 제어회로를 오프한다. 이어 (t+1) 시간에 속도센서신호가 검출되면, 제1 카운터의 카운터값을 제2 카운터에 저장하고, 제2 카운터의 카운터값이 하한속도 카운터값과 상한속도 카운터값 사이에 있는지를 판단한다. 속도센서신호가 검출되지 않으면, 제2 카운터값을 0으로 한다.

제 2 카운터의 카운터값이 상, 하한 속도 카운터값을 벗어나면, 규정된 속도범위를 벗어났으므로 제어회로를 오프(OFF)하고, 범위안에 속하면 제어회로를 온(ON)한 후 각 카운터의 저장값을 클리어하고, 다시 카운터를 시작한다. 만일, 전원이 오프하면 모든 제어과정을 종료한다. 이와 같이 모터 제어부는 제어대상의 속도를 감시하여 일정한 범위내에 있을 때만 PWM 신호에 따라 모터를 구동하여 운전자가 원하는 속도로 달릴 수 있게 하고, 속도범위를 벗어나면 모터의 구동을 오프하여 수동으로 구동하게 한다. 그리고 정상 속도 범위에서 운전중일지라도 모터가 과열되거나 과전류가 검출되면 즉시 모터구동을 차단하여 모터나 회로소자가 파손되는 것을 방지한다.

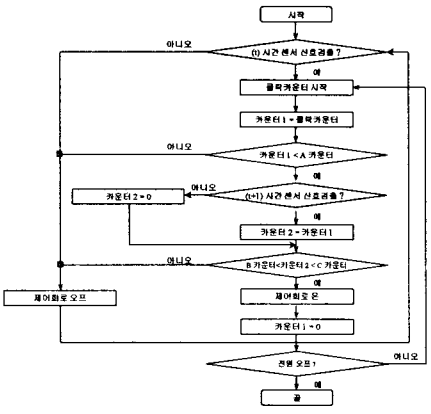
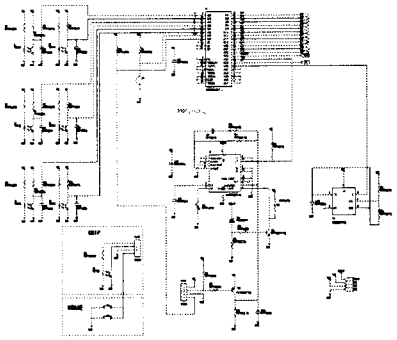


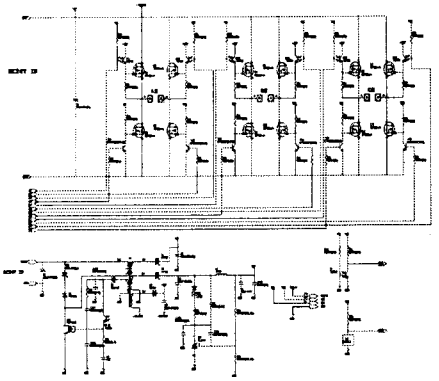
그림 14 제어블록선도

5. 실험 결과

전기자전거용 MPB BLDC 전동기는 다상의 독립권선으로 구성된 고정자와 규소강판 적층내에 페라이트자석을 방사형으로 매입한 회전자 및 자속을 측정할 수 있는 센서로 구성되었다. 따라서 전절에서 제어기를 구현하기 위하여 그림 15와 같이 회로를 구성하였으며, 속도제어 및 각각의 알고리즘을 구현하기 위한 EPLD의 VHDL 프로그램 및 Schematic 구조는 그림 16-17과 같다. 그림 18은 제작된 전동기 내장형 제어기이다. 그림 19는 PWM 제어 구동을 하지 않은 경우 무 부하시 A상 전압, A상 전류를 보여주고 있다. 그림 20은 PWM 전류제어를 통한 속도 가변의 경우 무 부하시 A상 전압, A상 전류를 보여주고 있다. 그림 21은 5NM가 인가된 상태에서의 회전속도 및 A상 전류 파형에서 보여주고 있다. 그림 22은 무부하시 각상의 전류구동 형태를 나타내고 있다. 제안된 알고리즘과 같이 양호하게 구동되고 있음을 알 수 있다.



(a) 제어기 회로



(b) 주회로 및 SMPS 회로

그림 15 제어기 회로 구성

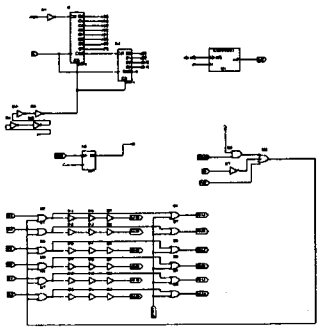


그림 17 EPLD의 Schematic 프로그램

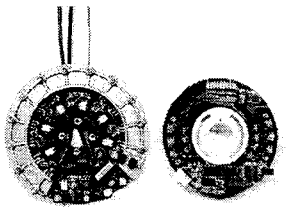


그림 18 모터 내장형 제어기 외형도

```
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use ieee.std_logic_unsigned.all;
entity compare1 is
        port(
        b           : in std_logic_vector(11 downto 0);
        st          : in std_logic;
        at2         : out std_logic);
end;
architecture design of compare1 is
        signal comout           : std_logic :='1';
        signal at               : std_logic :='1';
begin
        at2 <= at ;
        process(b)
        begin
                if b >=10#250# and b<=10#1550# then
                        comout <= '0';
                else    comout <= '1';
                end if;
        end process;
        process (at)
        begin
                if(st'event and st = '1') then
                at <= comout;
                end if;
                if  b >= 10#1600# then
                at <= '1';
                end if;
        end process;
end design;
```

그림 16 EPLD의 VHDL 프로그램

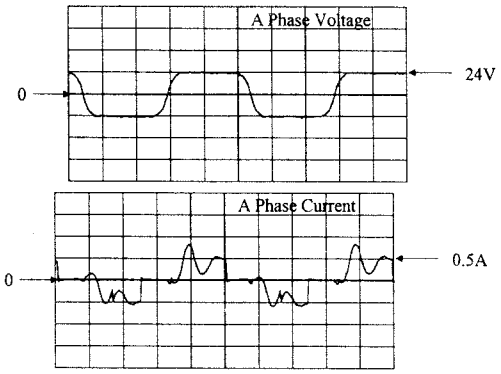


그림 19 A상 전압, A상 전류
(무부하시, PWM 전류제어를 하지 않은 경우, 5msec/div)

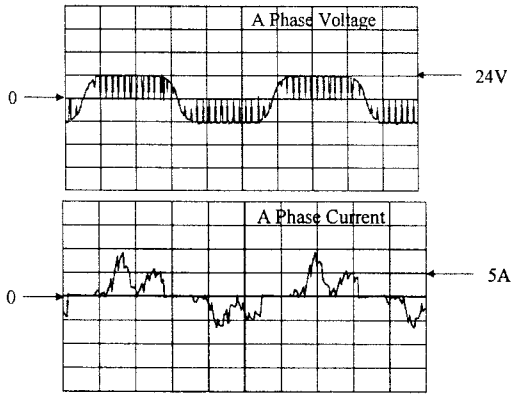


그림 20 A상 전압, A상 전류
(무부하시, PWM 전류제어를 한 경우, 5msec/div)

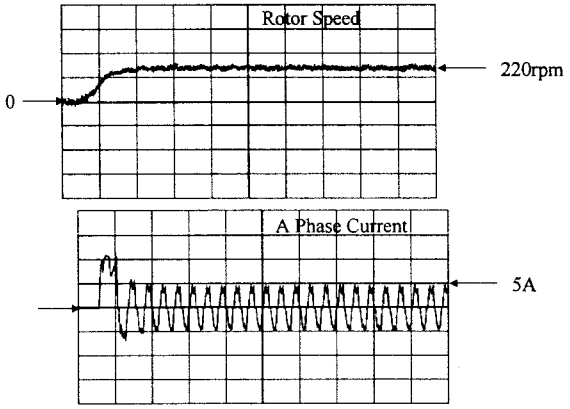


그림 21 회전속도, A상 전류
(5NM 부하시, PWM 전류제어를 하지 않은 경우, 0.1sec/div)

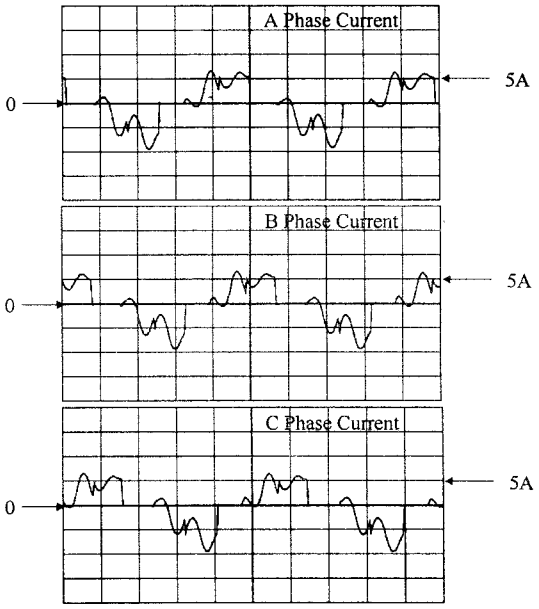


그림 22 A상, B상, C상 전류
(무부하시, PWM 전류제어를 하지 않은 경우, 5msec/div)

6. 결론

본 논문은 전기자전거 구동용 MPB BLDC 전동기의 구동장치를 설계 개발하였다. 성능 특성을 개선하기 위하여 설계된 MPB BLDC전동기를 구동하기 위하여 주회로 및 게이트제어회로를 설계하였으며, 속도제어 알고리즘을 구현하기 위하여 순수 디지털 CPU로서 EPLD를 사용하여, 프로그램을 설계하였다. 이를 토대로 고 효율 및 토오크 리플을 개선하였으며, 여자폭 변조(Excited Width Modulation), 양방향 제어(Bidirection Control), 부분 구형파 제어 (Partial Square Wave Control) 등이 구현되었다. 본 논문에서는 제어기의 안정성을 확보하기 위하여, 전류 및 온도 보호회로를 장착하였으며, 휴지기간이 존재하지 않도록 설계하였다. 속도제어 시스템을 구현하기 위한 하드웨어 및 소프트웨어는 실험을 통하여 전기자전거용 MBP BLDC 전동기의 우수한 성능을 보았다.

[참고문헌]

[1] "Brushless DC Motor Provides High Power Density and High Efficiency at Low Cost for Electric Transportation", PCIM, pp. 1-6, 1996, January.

[2] J. R. Hendershot Jr and Tje Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Clarendon Press, 1994

[3] "VHDL Reference Manual", Synopsis,1997.